

# **Entwicklung einer Ausgleichsfunktion zur Beschreibung des spröd-duktilen Übergangsbereichs im Kerbschlagbiegeversuch für strahlgeschweißte, vergütete Feinkornbaustähle**

*A. Hesse, Th. Nitschke-Pagel, K. Dilger*

*Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig*

*a.hesse@tu-braunschweig.de*

---

## **Abstract**

Strahlschweißungen in Baustählen können im Kerbschlagbiegeversuch mit einer Kerblage in der Schweißnaht ein temperaturabhängiges Rissauswandern zeigen. In der Tieflage und im unteren Übergangsbereich der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve breitet sich der Riss im Versuch in der Schweißnaht aus, wandert aber mit steigender Prüftemperatur vermehrt in den Bereich der Fusionslinie oder den Grundwerkstoff aus. Für die normgerecht Bewertung der Zähigkeit der Schweißnaht eignen sich jedoch nur Versuchsergebnisse mit einheitlichem Rissverlauf.

Für die vorgestellten Untersuchungen werden vergütete Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen zwischen 690 MPa und 1300 MPa mittels Laser- und Elektronenstrahl gefügt und anschließend Kerbschlagbiegeversuche an Proben mit einer Kerblage in der Schweißnaht zur Ermittlung von Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven durchgeführt. Um einen ausgewählten Bereich der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven mit hoher Genauigkeit zu beschreiben, werden für die Auswertung nur Proben mit einem Bruchverlauf in der Schweißnaht herangezogen. In der Regel decken diese Proben den spröd-duktilen Übergangsbereich ab, der zur Bestimmung wichtiger Kennwerte beschrieben werden muss. Ein Beispiel hierfür ist die  $T_{35\text{J/cm}^2}$ -Temperatur, bei welcher eine Kerbschlagzähigkeit von 35 J/cm<sup>2</sup> erreicht wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass der lokale Anstieg der Kerbschlagzähigkeit im spröd-duktilen Übergangsbereich für die untersuchten Probenreihen ähnlich ist, lediglich die Position auf der Temperaturachse variiert. Durch Normieren der verschiedenen Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven auf eine Referenztemperatur kann eine gemeinsame Ausgleichsfunktion ermittelt werden. Die Entwicklung dieser Funktion trägt dazu bei, die Probenanzahl zur Ermittlung von Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven

künftig zu reduzieren, bei einer gleichbleibend hohen Genauigkeit bei der Bestimmung einschlägiger Parameter, wie der  $T_{35J/cm^2}$ -Temperatur.

---

## **1 Referenztemperaturen aus Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven**

Die Ermittlung von Zähigkeitskennwerten kann mit Hilfe zweier Versuche geschehen: Dem Kerbschlagbiegeversuch nach [1] und dem Bruchmechanikversuch, beispielsweise nach [2, 3]. Während das Ergebnis des Kerbschlagbiegeversuchs ein Kennwert ist, welcher von den Probenabmessungen abhängig ist, lassen sich mit dem Bruchmechanikversuch Kennwerte ermitteln, welche geometrieunabhängig sind [4]. Dies ermöglicht den Vergleich zwischen rechnerisch ermittelten Mindestzähigkeiten und den vorhandenen Materialzähigkeiten aus dem Bruchmechanikversuch. Nachteilig im Vergleich zum Kerbschlagbiegeversuch ist die deutlich aufwändigere Versuchsdurchführung des Bruchmechanikversuchs. Daher wurden in der Vergangenheit Konzepte etabliert, welche auf empirischen Korrelationen aus dem Kerbschlagbiegeversuch und dem Bruchmechanikversuch basieren. Diese Korrelationen ermöglichen, mit einem einfachen Kennwert aus dem Kerbschlagbiegeversuch auf die Bruchzähigkeit aus dem Bruchmechanikversuch zu schließen. Sie werden sowohl in der Nukleartechnik verwendet, um die Neutronenversprödung an Kerbschlagbiegeproben überprüfen zu können [5], wie auch im Stahlbau, um bereits in der Bemessungsphase eine ausreichende Zähigkeit von Stahlbauten sicherstellen zu können [6].

Besagte Korrelationen beruhen auf der Temperatur als Korrelationsparameter. Hierfür wird die  $T_0$ -Temperatur aus dem Bruchmechanikversuch genutzt, die der Temperatur entspricht, bei der eine Bruchzähigkeit von  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  vorliegt. Diese wird mit einer Temperatur in Bezug gesetzt, welche bei einer bestimmten Kerbschlagarbeit im spröden-duktilen Übergangsbereich der Kerbschlagarbeits-Temperatur-Kurve vorliegt. Im Bereich der Nukleartechnik wird hierfür häufig eine Kerbschlagarbeit von 41 J genutzt, die hiermit assoziierte Temperatur ist dann die  $T_{41J}$ -Temperatur [5]. Im Stahlbau sind Kerbschlagarbeiten von 27 J (in Deutschland) bzw. 28 J (international) gängig, welche auch in den technischen Lieferbedingungen der Grundwerkstoffe gefordert werden [6]. Bezogen auf die Fläche im gekerbten Bereich der Kerbschlagbiegeprobe entspricht 28 J einer Kerbschlagzähigkeit von  $35 \text{ J/cm}^2$ . Die assoziierten Temperaturen werden dann als  $T_{28J}$ -Temperatur bzw.  $T_{35J/cm^2}$ -Temperatur bezeichnet.

Um bestehende Temperaturkorrelationen überprüfen zu können bzw. für neue Werkstoffgruppen weitere Temperaturkorrelationen aufstellen zu können, ist eine möglichst genaue Bestimmung der Referenztemperatur aus der Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve erstrebenswert.

## 2 Rissauswandern strahlgeschweißter Nähte

Strahlgeschweißte Stähle mit Kerb in der Schweißnaht zeigen im Kerbschlagbiegeversuch ein temperaturabhängiges Rissauswandern, siehe *Abb. 1*. Dieses Verhalten wird von der temperaturabhängigen Spaltbruchspannung sowie den lokal unterschiedlichen Streckgrenzen bestimmt, welche ebenfalls temperaturabhängig sind. Die Mechanismen, welche das Rissauswandern beeinflussen sind bereits in der Literatur, beispielweise in [7,8] eingehend beschrieben worden.

Bei niedrigen Temperaturen wird die Spaltbruchspannung in der Schweißnaht im Bereich des Kerbgrunds überschritten, ein Sprödbbruch in der Schweißnaht tritt ein und der Riss verläuft in der Schweißnaht. Die Kerbschlagarbeit, die mit diesen Proben ermittelt wird, wird ausschließlich durch das Schweißnahtgefüge beeinflusst. Kommt es zum Rissauswandern, so wird die ermittelte Kerbschlagarbeit auch durch den Werkstoff beeinflusst, in den der Riss auswandert, also die Wärmeeinflusszone (WEZ) und ggf. den Grundwerkstoff. [7,8]

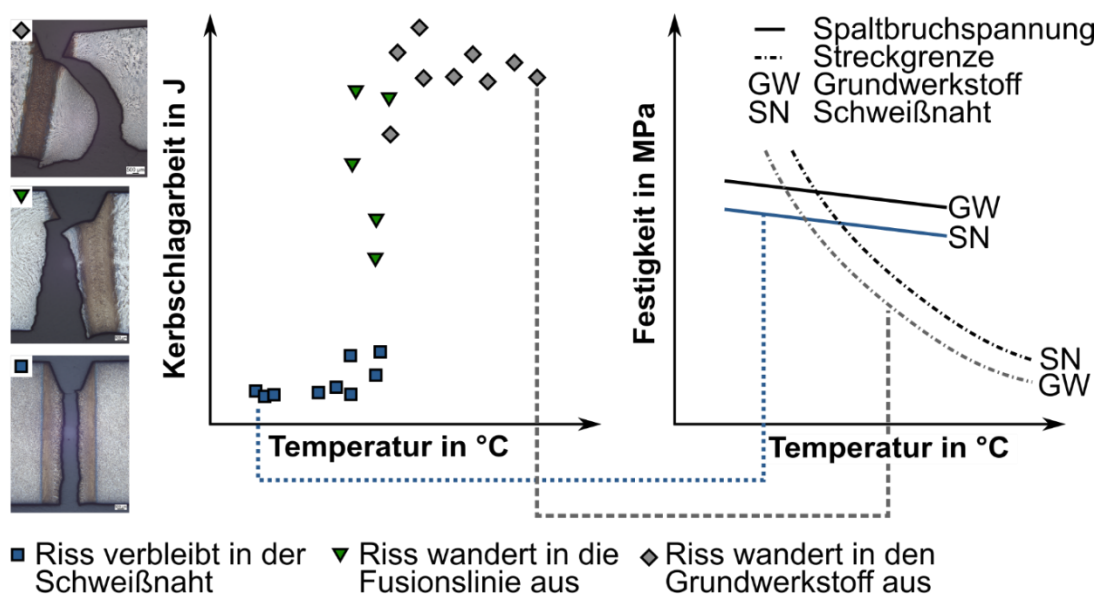


Abb. 1: Einfluss der Temperatur auf das Rissauswandern im Kerbschlagbiegeversuch

Mit steigenden Temperaturen nehmen sowohl die Spaltbruchspannung, wie auch die lokalen Streckgrenzen ab. Letztere zeigen allerdings eine stärkere Temperaturabhängigkeit, sodass die Streckgrenzen der Schweißnaht, der WEZ und des Grundwerkstoffs unter die Spaltbruchspannung fallen und somit entscheidend für das Versagen der Kerbschlagbiegeprobe werden, wie im rechten Teil der *Abb. 1* gezeigt. Durch die Aufhärtung der strahlgeschweißten Naht ist die lokale Streckgrenze der Schweißnaht höher als die Streckgrenze der angrenzenden WEZ und des Grundwerkstoffs, sodass es zu Plastifizierungen in der WEZ oder im Grundwerkstoff kommt und der Riss im Kerbschlagbiegeversuch in diese Bereiche auswandert. Es wird in der Literatur zwischen einem Auswandern in die Fusionslinie und den Grundwerkstoff unterschieden. Das Auswandern in die Fusionslinie tritt im Übergangsbereich der Kerbschlagzähigkeits-Temperaturkurve auf, kann aber nicht in allen Fällen gefunden werden. Häufig zeigt sich auch ein bimodales Verhalten, bei dem entweder ein Rissverlauf in der Schweißnaht oder das Auswandern in den Grundwerkstoff beobachtet werden. [7,8]

Weitere Faktoren, welche das Rissauswandern im Kerbschlagbiegeversuch beeinflussen, sind die Unterschiede der lokalen Streckgrenzen sowie die Breite der Schweißnaht. Weist der Grundwerkstoff bereits eine ähnlich hohe Härte wie die durch das Schweißen aufgehärtete Strahlschweißung auf, so kann dies ein Rissauswandern, auch im Bereich der Hochlage, verhindern. Auch sehr breite Strahlschweißungen können dazu führen, dass es nicht zum Rissauswandern kommt. In diesem Fall sind die Bereiche in der WEZ und im Grundwerkstoff so weit von der Kerbe entfernt, dass es in der Schweißnaht zu einem plastischen Kollaps kommt, bevor die lokalen Streckgrenzen der WEZ oder des Grundwerkstoffs überschritten werden. [7,8]

### **3 Datenbasis und Auswertung**

Für die Untersuchungen werden 14 Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven mit insgesamt über 280 Einzelversuchen strahlgeschweißter Vergütungsstähle geprüft und ausgewertet. Die Grundwerkstoffe weisen nominelle Streckgrenzen zwischen 690 MPa und 1300 MPa auf und liegen in Blechdicken zwischen 10 mm und 30 mm vor. Als Schweißverfahren werden Scheibenlaserstrahlschweißungen (SL), CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißungen (CO<sub>2</sub>) sowie Elektronenstrahlschweißungen (EB) genutzt, ein Zusatzwerkstoff wird nicht verwendet. Eine Versuchsmatrix ist in *Tab. 1* dargestellt. Für weitere Details zu den verwendeten Werkstoffen, den Schweißparametern und Härteverläufen wird auf die Quellen [9] und [10] verwiesen. Die Härten in den Schweißnähten

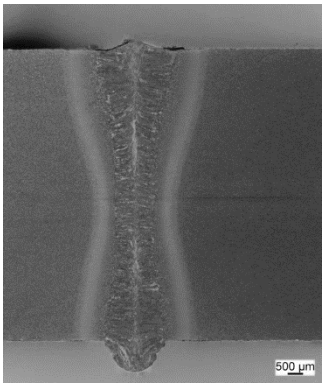

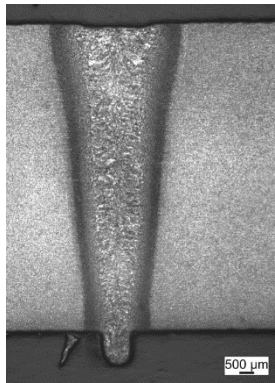
liegen zwischen 405 und 450 HV 1, durch das schnelle Abkühlen des Werkstoffs infolge des Strahlschweißprozesses liegt eine erhebliche Aufhärtung vor.

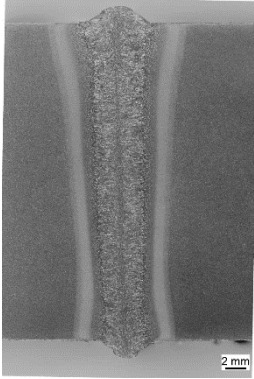
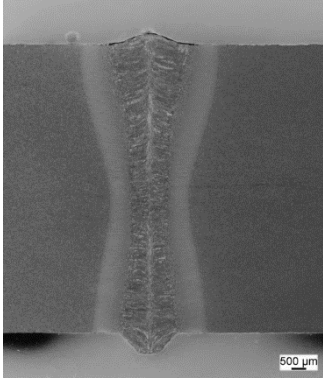
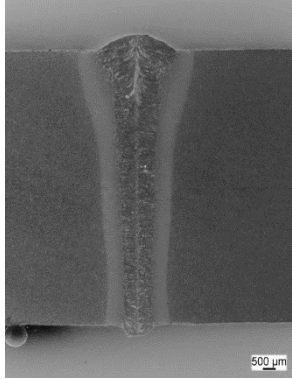
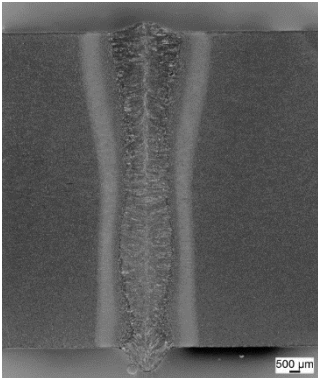
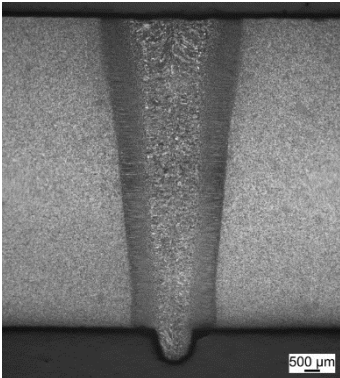
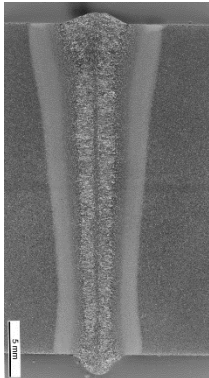
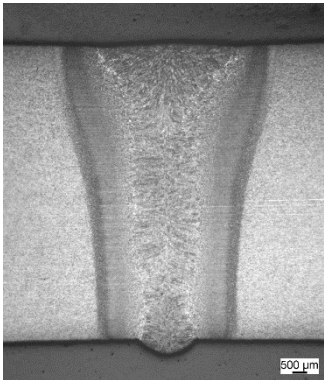
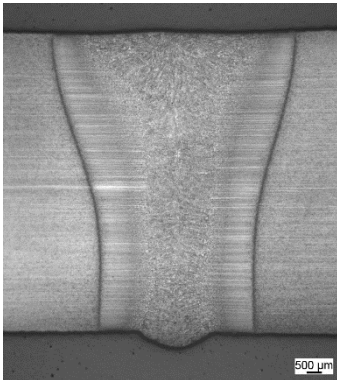
*Tab. 1: Aufteilung der Versuche nach Grundwerkstoffen, Schweißverfahren und Blechdicken*

	<b>Scheibenlaser</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Laser</b>	<b>Elektronenstrahl</b>
<b>S690QL</b>	10 mm, eine Reihe	15 mm, eine Reihe	10 mm, eine Reihe 30 mm, zwei Reihen
<b>S960QL</b>	10 mm, zwei Reihen	10 mm, eine Reihe 15 mm, eine Reihe	10 mm, eine Reihe 30 mm, zwei Reihen
<b>S1100QL</b>	10 mm, eine Reihe	Keine Daten	Keine Daten
<b>S1300QL</b>	10 mm, eine Reihe	Keine Daten	Keine Daten

In der Tab. 2 sind Querschliffe der einzelnen Versuchsreihen dargestellt und, sofern verfügbar, die zum Schweißen verwendete Streckenenergie.

*Tab. 2: Querschliffe zu den Versuchsreihen und Streckenenergie; SL = Scheibenlaserschweißung; CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>-Laserschweißung; EB = Elektronenstrahlschweißung*

<p><b>S690QL, SL, 10 mm</b></p>  <p>E = 0,39 kJ/mm</p>	<p><b>S690QL, CO<sub>2</sub>, 15 mm</b></p>  <p>E = 0,75 kJ/mm</p>	<p><b>S690QL, EB, 10 mm</b></p>  <p>E = 0,42 kJ/mm</p>
---	---	---

<b>S690QL, EB, 30 mm</b>  $E = 3,2 \text{ kJ/mm}$	<b>S960QL, SL, 10 mm</b>  $E = 0,36 \text{ kJ/mm}$	<b>S960QL, CO<sub>2</sub>, 10 mm</b>  $E = 0,35 \text{ kJ/mm}$
<b>S960QL, CO<sub>2</sub>, 15 mm</b>  $0,71 \text{ kJ/mm}$	<b>S960QL, EB, 10 mm</b>  $0,42 \text{ kJ/mm}$	<b>S960QL, EB, 30 mm</b>  $E = 3,2 \text{ kJ/mm}$
<b>S1100QL, SL, 10 mm</b>  	<b>S1300QL, SL, 10 mm</b>  	

Die Proben werden durchgehend auf die Normmaße für Charpy-V-Proben nach DIN EN ISO 148-1 heruntergearbeitet. Bei den 10 mm dicken Blechen müssen in einigen Fällen Proben mit leichtem Untermaß verwendet werden, sodass im Zuge der Auswertung durchgehend die Kerbschlagzähigkeit, also eine Normierung der Kerbschlagarbeit auf die Querschnittsfläche, verwendet wird. Die geringste Probendicke liegt bei

9,82 mm. Bei den Versuchsreihen aus dem 30 mm dicken Blech werden Proben oberflächennah und in der Mitte der Blechdicke entnommen. [1]

Der Kerb wird in Blechdickenrichtung in die Schweißnaht eingebracht. Um eine zuverlässige Positionierung des Kerbs in dem angestrebten Bereich sicherzustellen, werden die Proben zunächst mit Überlänge hergestellt und angeätzt. Anschließend kann der Kerb mit der erforderlichen Genauigkeit positioniert werden.

Die Prüfung erfolgt in einem Schlagwerk mit einem Nennarbeitsvermögen von 450 J. Die Temperierung der Proben erfolgt je nach angestrebter Temperatur mittels flüssigem Stickstoff, gekühltem Ethanol oder erhitztem Wasser. Nach dem Versuch werden die Bruchflächen makroskopisch auf Unregelmäßigkeiten untersucht, welche das Versuchsergebnis beeinflusst haben könnten. Alle Proben werden hinsichtlich eines möglichen Rissauswanderns untersucht. In den Fällen, in denen ein Rissauswandern makroskopisch nicht eindeutig zu identifizieren ist, werden zusätzliche Querschliffe angefertigt.

Die Auswertung der Versuche wird mit dem Ziel durchgeführt, eine möglichst gute Approximation der  $T_{35J/cm^2}$ -Temperatur zu erreichen. Da durch das Rissauswandern unstete Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven entstehen können, welche insbesondere bei bimodalem Versagensverhalten keine Daten im Übergangsbereich der Kurve aufweisen, wird auf eine durchgehende Auswertung mit einer üblicherweise genutzt Sigmoidfunktion verzichtet. Vielmehr wird der Bereich ausgewertet, in dem kein Rissauswandern stattfindet und dessen Proben somit ausschließlich Aussagen über die Zähigkeit der Schweißnaht zulassen. Die Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurve weist in diesem Bereich einen exponentiellen Anstieg auf, sodass die allgemeine Gl. (1) zur Datenanpassung genutzt wird. Diese wird zunächst linearisiert und die Parameter A und B werden mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate für jede Datenreihe bestimmt.

$$y = a \cdot \exp(b \cdot x) \quad (1)$$

Anschließend wird für jede Datenreihe die Temperatur bestimmt, bei der 35 J/cm<sup>2</sup> Kerbschlagzähigkeit vorliegen.

## 4 Ergebnisse

In Abb. 2 sind die resultierenden  $T_{35J/cm^2}$ -Temperaturen über der nominellen Streckgrenze der Werkstoffe aufgetragen. Die ermittelten Temperaturen liegen zwischen – 104 °C und 3 °C. Tendenziell können steigende Übergangstemperaturen mit steigender Streckgrenze beobachtet werden, allerdings zeigt sich gleichzeitig eine hohe Streuung der Übergangstemperaturen. Die individuellen  $T_{35J/cm^2}$ -Temperaturen sind stark von

der chemischen Zusammensetzung der Grundwerkstoffe sowie der vorliegenden Korngröße abhängig [11].

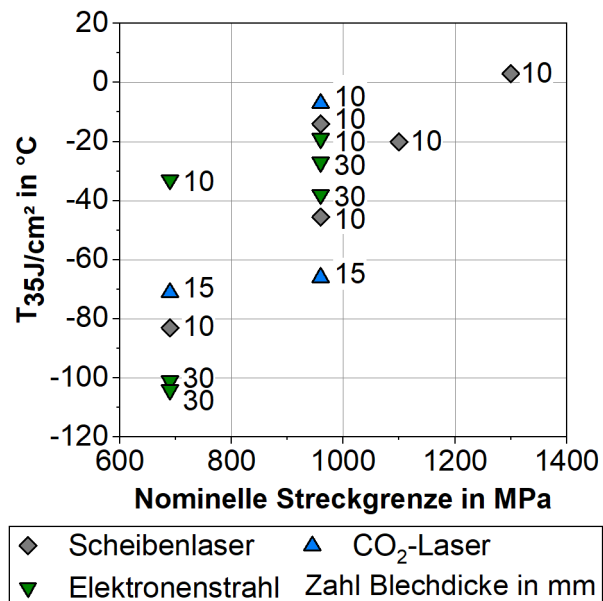


Abb. 2: Abhängigkeit der ermittelten  $T_{35J/cm^2}$ -Temperaturen von der nominellen Streckgrenze

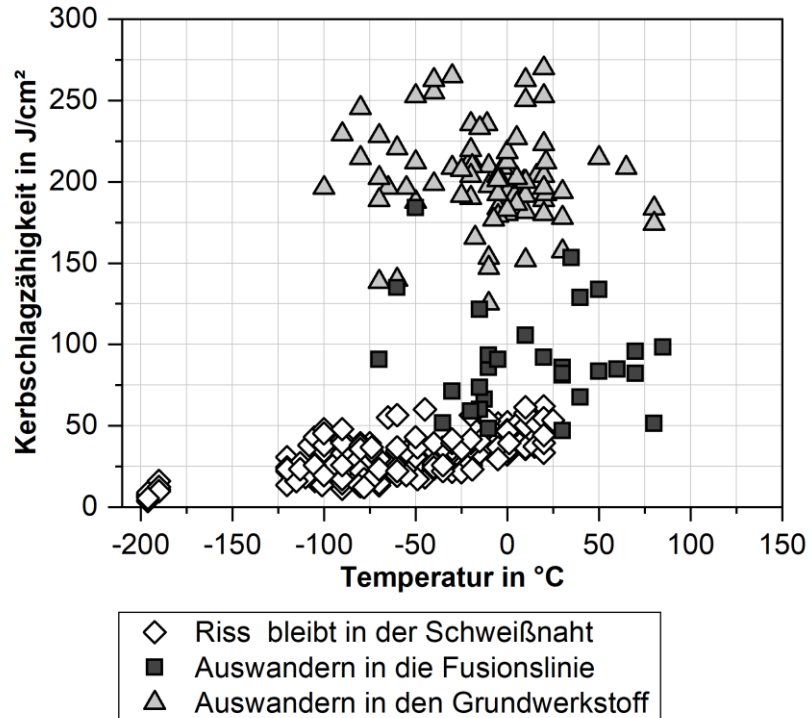
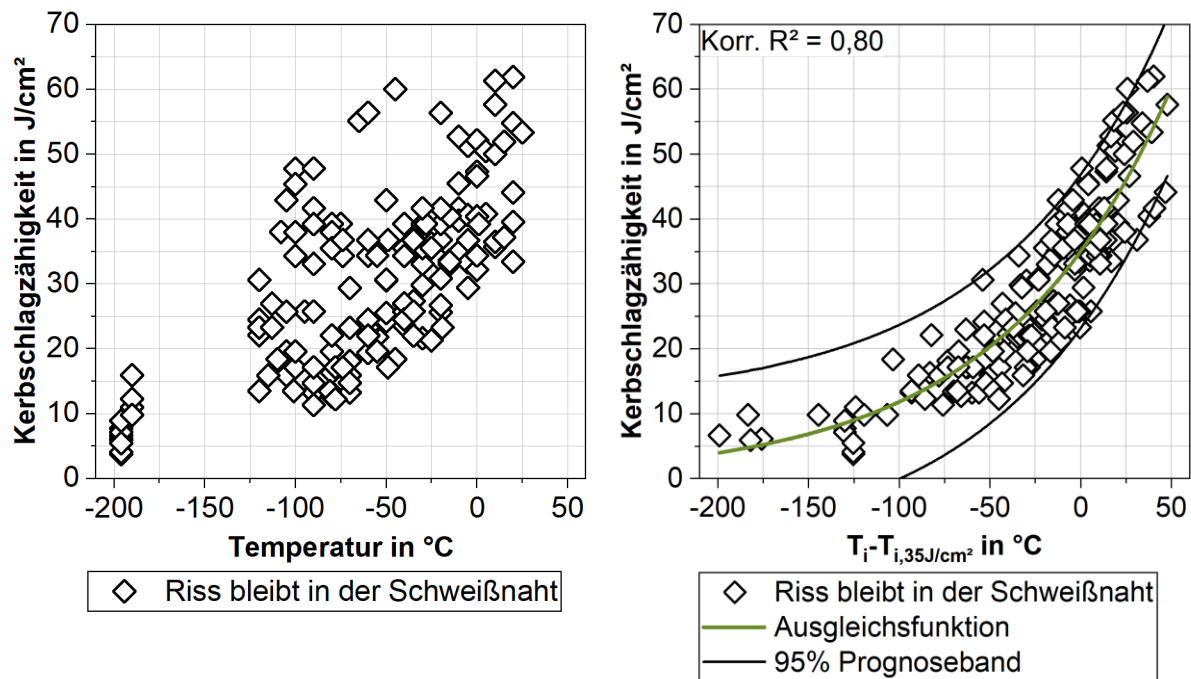


Abb. 3: Zusammenfassung aller Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven



Die hohe Streuung, welche sich auch bereits in *Abb. 3* zeigt, wird auch bei Betrachtung aller gemeinsam aufgetragenen Versuchsdaten in *Abb. 4* deutlich. Die Kerbschlagzähigkeit der Proben mit einem Versagen in der Schweißnaht weisen einen maximalen Wert von  $62 \text{ J/cm}^2$  auf. Das Auswandern in die Fusionslinie, insbesondere aber auch in den Grundwerkstoff, bewirkt eine Zunahme der Kerbschlagzähigkeit bis zu einem maximalen Wert von  $270 \text{ J/cm}^2$ .



*Abb. 4: Kerbschlagzähigkeit aller in der Schweißnaht gebrochenen Proben; Links: In Abhängigkeit der Prüftemperatur; Rechts: In Abhängigkeit der normierten Prüftemperatur*

In der *Abb. 4* im linken Bereich sind die Kerbschlagzähigkeiten von Proben mit einem Versagen in der Schweißnaht dargestellt. Diese zeigen einen tendenziell steigenden Trend, aber gleichzeitig eine große Streuung, sodass sie nicht zur Vorhersage oder Modellbildung genutzt werden können. Anders gestaltet sich dies, wenn man die Kerbschlagzähigkeit über der normierten Prüftemperatur aufträgt, wie im rechten Bereich der *Abb. 4* geschehen. Hierfür wurde von den Prüftemperaturen der einzelnen Prüfreihe die jeweilige, für die Prüfreihe ermittelte,  $T_{35\text{J/cm}^2}$ -Temperatur abgezogen. Aus dem Trend bildet sich ein exponentieller Kurvenverlauf zur Beschreibung der Kerbschlagzähigkeit  $A_V$  aus, welcher mit der Gl. (2) beschrieben werden kann und die Parameter  $a = 35 \text{ J/cm}^2$  sowie  $b = 0,01087 \text{ °C}^{-1}$  besitzt.

$$A_V = a \cdot \exp\left(b \cdot (T - T_{35J/cm^2})\right) \quad (2)$$

Die Größe für den Parameter  $a$  ergibt sich aus der Temperaturnormierung der Kurven auf  $35 \text{ J/cm}^2$ , der Parameter  $b$  beschreibt die Steigung der exponentiellen Kurve. Mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,80$  zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ausgleichsfunktion mit den Versuchsdaten.

Die Formel für das untere bzw. obere Prognoseband im rechten Teil der *Abb. 4* kann nicht mehr mit Hilfe der *Gl. (1)* beschrieben werden, da diese Kurven naturgemäß nicht gegen Null streben. Daher wird zur Angabe einer Formel für die Prognosebänder die *Gl. (3)* herangezogen. Hierin stellen  $x_0$  und  $y_0$  die jeweiligen Schnittpunkte mit der Abszisse bzw. Ordinate dar,  $c$  und  $d$  sind die resultierenden Fitkonstanten.

$$y = y_0 + c \cdot \exp((x - x_0) / d) \quad (3)$$

Oberes Prognoseband:

$$y_0 = 11,878 \text{ J/cm}^2$$

$$x_0 = -209,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 3,566 \text{ J/cm}^2$$

$$d = 91,777 \text{ }^\circ\text{C}$$

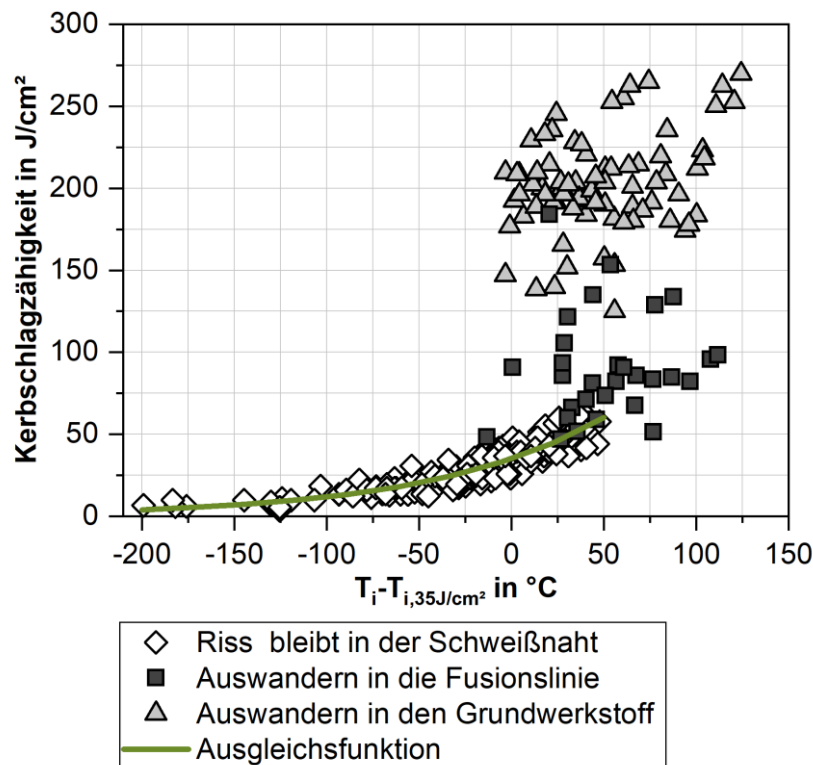
Unteres Prognoseband:

$$y_0 = -12,729 \text{ J/cm}^2$$

$$x_0 = -84,168 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 14,828 \text{ J/cm}^2$$

$$d = 95,168 \text{ }^\circ\text{C}$$



*Abb. 5: Kerbschlagzähigkeit aller Proben in Abhängigkeit der normierten Prüftemperatur*

Auch in der Gesamtdarstellung der temperaturnormierten Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven in *Abb. 5* zeigt sich im Vergleich zu *Abb. 3* eine deutlich verringerte Streuung.

## **5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Der Prozess des Strahlschweißens kann insbesondere in der Schweißnaht von Baustählen zu einer Verminderung der Kerbschlagzähigkeit im Vergleich zum Grundwerkstoff führen. Um insbesondere den kritischen, spröde-duktilen Übergangsbereich auch mit einer eingeschränkten Anzahl von Proben charakterisieren zu können und eine  $T_{35J/cm^2}$ -Temperatur ableiten zu können, ist eine Datenbasis aus vierzehn Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven strahlgeschweißter, in der Naht gekerbter Proben aus Vergütungsstählen aufgestellt worden.

Wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass sich der spröde-duktiler Übergangsbereich im Kerbschlagbiegeversuch mittels einer einheitlichen Exponentialfunktion beschreiben lässt, siehe *Gl. (2)*. Durch die Nutzung einer einheitlichen Funktion zur Beschreibung dieses Bereichs kann, insbesondere dann, wenn nur wenig Proben vorliegen, dennoch eine Aussage über den lokalen Verlauf der Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur getroffen werden. Hierfür kann sowohl die Mittelwertkurve aus *Gl. (2)* genutzt werden, bei einem erhöhten Sicherheitsbedürfnis aber auch beispielsweise die untere Grenzkurve der in *Abb. 4* dargestellten Datenschar. Somit wird auch die Ermittlung von  $T_{35J/cm^2}$ -Werten für die anfangs beschriebene Temperaturkorrelationen zwischen der Kerbschlagzähigkeit und der Bruchzähigkeit vereinfacht. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn beispielsweise aus einem bestehenden Bauteil nur wenig Material zur Charakterisierung entnommen werden kann.

Von Bruchmechanikversuch an ferritischen Stählen ist bekannt, dass sich auch die Bruchzähigkeit im unteren Übergangsbereich mittels einer Exponentialfunktion beschreiben lässt. Diese Erkenntnis ist für Bruchmechanikversuche bereits in das einschlägige Regelwerk (ASTM E 1921) übertragen worden, sodass hier aufgrund der breiten Datenbasis die Beschreibung des spröde-duktilen Übergangsbereichs mittels nur weniger Versuche bei einer einheitlichen Temperatur möglich ist, [12,13].

Um diese Art allgemeingültiger Empfehlungen aussprechen zu können, bedarf es für strahlgeschweißte Vergütungsstähle sicherlich noch einer größeren Datenbasis, um weitere Schweißparameter und chemische Zusammensetzungen abzudecken. Dennoch konnten die vorgestellten Untersuchungen bereits zeigen, dass die Abbildung des spröde-

duktilen Übergangsbereichs mittels Exponentialfunktion ein vielversprechender Weg ist, der zu einer deutlichen Verminderung der geprüften Proben bei der Erstellung von Kerbschlagzähigkeits-Temperatur-Kurven führen kann.

## **Literatur**

- [1] Norm DIN EN ISO 148-1: Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren. Ausg. 5.2017. Berlin: Beuth Verlag.
- [2] Norm ASTM E 1820-18a: Standard test method for measurement of fracture toughness. Annual book of ASTM standards, 2018.
- [3] Norm DIN EN ISO 12737: Metallische Werkstoffe - Bestimmung der Bruchzähigkeit (ebener Dehnungszustand). Ausg. 4.2011. Berlin: Beuth Verlag.
- [4] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Springer-Verlag, 2019.
- [5] EricksonKirk, M. A.; EricksonKirk, M. T.; Rosinski, S.; Spanner, J.: A comparison of the tanh and exponential fitting methods for Charpy V-notch energy data. Journal of pressure vessel technology, 131(3), 2009.
- [6] Sedlacek, G.; Feldmann, M.; Kühn, B.; Tschickardt, D.; Höhler, S.; Müller, C.; Hensen, W.; Stranghöfner, N.; Dahl, W.; Langenberg, P.; Münstermann, S.; Brozzetti, J.; Raoul, J.; Pope, R.; Bijlaard, F.: Commentary and worked examples to EN 1993-1-10. Material toughness and through thickness properties and other toughness oriented rules in EN. JRC Scientific and Technical Reports, 2008.
- [7] Nagel, M.; Langenberg, P.; Lüder, F.; Bleck, W.; Diltthey, U.: Discussion of testing procedures for the determination of the toughness properties of laser welded joints. European Structural Integrity Society, Vol. 30, pp. 253-261, Elsevier, 2002.
- [8] Lüder, F.: Prüfung laserstrahlgeschweißter Verbindungen. Shaker, 2002.
- [9] Nitschke-Pagel, Th.: Untersuchungen zum Einfluss von Härte- und Gefügezustand strahlgeschweißter Verbindungen auf deren Verformungs- und Tragverhalten, Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 18.174 B, DVS-Nr. 09.075, Braunschweig, 2017.
- [10] Hesse, A.; Nitschke-Pagel, T.; Dilger, K.: Konzept zur Vermeidung von Sprödbruch hoch- und ultrahochfester Stähle, Laufende Berichterstattung zum IGF-Vorhaben Nr. 20.350 N, DVS-Nr. 09.1014, Braunschweig, 2020.

- [11] Pallaspuro, S.: On the factors affecting the ductile-brittle transition in as-quenched fully and partially martensitic low-carbon steels. Acta Unive. Oulu: University of Oulu, 2018.
- [12] Norm ASTM E 1921-19: Standard test method for determination of reference temperature,  $T_0$ , for ferritic steels in the transition range. Annual book of ASTM standards, 2019.
- [13] Wallin, K.: The Scatter in  $K_{Ic}$  Results. Engineering Fracture Mechanics 19(6), S. 1085 – 1093, 1984.

### **Autorenanschrift**

Ann-Christin Hesse

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Füge- und Schweißtechnik  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig

Telefon: 0531-391 95528

E-Mail: a.hesse@tu-braunschweig.de